



⑮ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 101 24 474 A 1**

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 03 F 7/20**  
G 02 B 13/00  
G 03 F 7/00

⑳ Aktenzeichen: 101 24 474.6  
㉔ Anmeldetag: 19. 5. 2001  
㉕ Offenlegungstag: 21. 11. 2002

DE 101 24 474 A 1

㉑ **Anmelder:**  
Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE  
  
㉒ **Vertreter:**  
Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster &  
Partner, 70174 Stuttgart

㉓ **Erfinder:**  
Gruner, Toralf, Dr., 09122 Chemnitz, DE; Maul,  
Manfred, Dr., 73431 Aalen, DE; Büнау, Rudolf von,  
Dr., 73457 Essingen, DE

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

US 57 15 084  
US 55 37 260  
EP 09 64 282 A2

JP 11054411 A., In: Patent Abstracts of Japan;

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ Mikrolithographisches Belichtungsverfahren sowie Projektionsobjektiv zur Durchführung des Verfahrens

⑤⑦ Bei einem mikrolithographischen Belichtungsverfahren, bei dem das Bild eines in der Objektebene eines Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine Bildebene des Projektionsobjektivs abgebildet wird, werden mit Hilfe spezieller optischer Korrekturmittel die optischen Wege von s-polarisiertem und p-polarisiertem Licht so beeinflusst, dass Lichtstrahlen beider Polarisationsrichtungen zwischen Objektebene und Bildebene im wesentlichen den gleichen optischen Weg zurücklegen bzw. dass ein vorhandener optischer Wegunterschied im wesentlichen unabhängig vom Strahleinfallswinkel in der Bildebene ist. Dadurch können strukturellrichtungsabhängige Kontrastunterschiede bei der Abbildung feiner Strukturen vermieden werden. Diese Kontrastunterschiede können bei unkorrigierten Projektionsobjektiven aufgrund der Verwendung von spannungsoptisch wirksamen Materialien und/oder aufgrund von unter großen Einfallswinkeln betriebenen, beschichteten Optikkomponenten, wie Umlenkspiegeln, entstehen.

DE 101 24 474 A 1

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erzeugung eines Bildes eines in einer Objektebene eines Projektionsobjektives angeordneten Musters in eine Bildebene des Projektionsobjektives, ein Projektionsobjektiv zur Durchführung dieses Verfahrens sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Projektionsobjektives.

[0002] Derartige Belichtungsverfahren und Projektionsobjektive werden in Projektionsbelichtungsanlagen zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen verwendet, beispielsweise in Waferscannern oder Wafersteppern. Sie dienen dazu, Muster von Photomasken oder Strichplatten, die nachfolgend allgemein als Masken oder Retikel bezeichnet werden, auf einen mit einer lichtempfindlichen Schicht beschichteten Gegenstand mit höchster Auflösung in verkleinerndem Maßstab zu projizieren.

[0003] Dabei ist es zur Erzeugung immer feinerer Strukturen notwendig, einerseits die bildseitige numerische Apertur (NA) des Projektionsobjektives zu vergrößern und andererseits immer kürzere Wellenlängen zu verwenden, vorzugsweise Ultraviolettlicht mit Wellenlängen von weniger als ca. 260 nm.

[0004] In diesem Wellenlängenbereich stehen nur noch wenig ausreichend transparente Materialien zur Herstellung der optischen Komponenten zur Verfügung, insbesondere synthetisches Quarzglas und Fluoridkristalle, wie Kalziumfluorid. Diese Materialien sind spannungsoptisch wirksam, können also aufgrund induzierter Doppelbrechung am durchtretenden Licht Wirkungen hervorrufen, die für die senkrecht zueinander stehenden Feldkomponenten des elektrischen Feldvektors des durchtretenden Lichtes unterschiedlich sind.

[0005] Da zudem die Abbe-Konstanten der verfügbaren Materialien relativ nahe beieinanderliegen, ist es schwierig, rein refraktive Systeme mit ausreichender Korrektur von Farbfehlern bereitzustellen. Daher werden für höchstauflösende Projektionsobjektive überwiegend katadioptrische Systeme favorisiert, bei denen brechende und reflektierende Komponenten, insbesondere also Linsen und Spiegel, kombiniert sind. Diese Systeme weisen häufig Umlenkspiegel auf, die unter großen Einfallswinkeln betrieben werden und dazu dienen, zwischen Objektebene und Bildebene des Projektionsobjektives eine Umlenkung des Lichtes auf einen oder mehrere Konkavspiegel oder von diesen zurück zu bewirken. Um eine hohe Reflektivität dieser Spiegel zu gewährleisten, werden diese üblicherweise mit Reflexschichten, meist Mehrfachsichten, belegt. Die teilweise stark gekrümmten Linsenflächen sind in der Regel zur Reflexionsminderung ebenfalls beschichtet, wobei auch diese Schichten teilweise unter hohen Einfallswinkeln durchleuchtet werden. Durch dielektrische Schichten, die unter hohem Einfallswinkel betrieben werden, kann das durchtretende Licht polarisationsabhängig beeinflusst werden.

[0006] Es ist beobachtet worden, daß bei katadioptrischen Systemen der erwähnten Art verschiedene im abzubildenden Muster enthaltene Strukturrichtungen manchmal mit unterschiedlichem Kontrast abgebildet werden. Diese Kontrastunterschiede für verschiedene Strukturrichtungen werden auch als H-V-Differenzen (Horizontal-Vertikal-Differenzen) im abgebildeten Muster bezeichnet und machen sich im Photoresist als unterschiedliche Linienbreiten für die verschiedenen Strukturrichtungen bemerkbar.

[0007] Es sind verschiedene Vorschläge zur Vermeidung solcher richtungsabhängigen Kontrastunterschiede gemacht worden. Die EP 964 282 A2 beschäftigt sich mit dem Problem, daß bei katadioptrischen Projektionssystemen mit

Umlenkspiegeln beim durchtretenden Licht eine Polarisationsvorzugsrichtung eingeführt wird, die sich dadurch ergibt, daß die mehrfach beschichteten Umlenkspiegel unterschiedliche Reflexionsgrade für s- und p-polarisiertes Licht haben.

Dadurch wird Licht, das in der Retikelebene noch unpolarisiert ist, in der Bildebene teilweise polarisiert, was zu einer Richtungsabhängigkeit der Abbildungseigenschaften führen soll. Diesem Effekt wird nach dem dortigen Vorschlag dadurch entgegengewirkt, daß im Beleuchtungssystem durch Erzeugung von teilweise polarisiertem Licht mit vorgegebenem Restpolarisationsgrad ein Vorhalt an Polarisation geschaffen wird, der durch die Projektionsoptik so kompensiert wird, daß an deren Ausgang unpolarisiertes Licht austritt.

[0008] Aus der EP 0 602 923 B1 (entsprechend US-A-5,715,084) ist ein katadioptrisches Projektionsobjektiv mit Polarisationsstrahlteiler bekannt, welches ebenfalls im Hinblick auf strukturentscheidungsabhängige Kontrastunterschiede optimiert sein soll. Das mit linear polarisiertem Licht betriebene Projektionsobjektiv hat zwischen dem Strahlteilerwürfel und der Bildebene eine Einrichtung zur Änderung des Polarisationszustandes des durchtretenden Lichtes, durch welche das einfallende linear polarisierte Licht in zirkular polarisiertes Licht umgewandelt wird, das bezüglich der Intensitäten der orthogonalen Feldkomponenten äquivalent zu unpolarisiertem Licht ist. Damit soll ein von der Strukturrichtung unabhängiger Abbildungskontrast sichergestellt werden. Ein entsprechender Vorschlag wird auch in der EP 0 608 572 (entsprechend US-A-5,537,260) gemacht.

[0009] Es hat sich gezeigt, daß trotz der beschriebenen Maßnahmen Kontrastunterschiede zwischen verschiedenen Strukturrichtungen von Masken auftreten können, insbesondere bei hochaperturigen katadioptrischen Projektionsobjektiven mit mindestens einem Umlenkspiegel.

[0010] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein insbesondere in der Mikrolithographie verwendbares Belichtungsverfahren, ein dafür geeignetes Projektionsobjektiv sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Projektionsobjektives vorzuschlagen, durch die die Nachteile des Standes der Technik vermieden werden können. Insbesondere soll eine Abbildung im wesentlichen ohne Kontrastunterschiede für verschiedene Strukturrichtungen ermöglicht werden.

[0011] Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1, ein Projektionsobjektiv mit den Merkmalen von Anspruch 7 sowie ein Verfahren zur Herstellung eines derartigen Projektionsobjektives mit den Merkmalen von Anspruch 21 vor. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

[0012] Bei erfindungsgemäßen Verfahren wird das Projektionsobjektiv mit Licht durchstrahlt, dessen elektrischer Feldvektor eine erste Feldkomponente und eine senkrecht dazu stehende zweite Feldkomponente hat bzw. in diese Feldkomponenten zerlegbar ist. Das Verhältnis der Feldkomponenten bestimmt den Polarisationszustand des Lichts.

[0013] Die Strahlen des Lichtbündels fallen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln auf optische Komponenten des Projektionsobjektives ein. Die optischen Komponenten ergeben einen optischen Aufbau, bei dem zwischen einem ersten optischen Weg, der von ersten Lichtstrahlen mit einer ersten Polarisationsrichtung zurückgelegt wird, und einem zweiten optischen Weg, der von zweiten Lichtstrahlen mit einer von der ersten Polarisationsrichtung abweichenden zweiten Polarisationsrichtung zurückgelegt wird, in mindestens einem Bereich der Bildebene ein optischer Wegunterschied auftritt. Dieser optische Wegunterschied wird erfin-

dungsgemäß durch gezielte Veränderung des ersten optischen Weges und/oder des zweiten optischen Weges derart kompensiert, daß in der Bildebene eine Differenz der optischen Wege der ersten Lichtstrahlen und der zweiten Lichtstrahlen im wesentlichen unabhängig vom Strahleinfalls-  
winkel ist.

[0014] Es wird also durch mindestens ein speziell auf das Projektionsobjektiv abgestimmtes optisches Korrekturmittel ein erwünschter optischer Wegunterschied für Lichtstrahlen unterschiedlicher Polarisationsrichtungen in Abhängigkeit vom Durchtrittsort und vom Durchtrittswinkel erzeugt. Dieser erwünschte optische Wegunterschied gleicht genau den aufgrund der anderen optischen Komponenten entstandenen, unerwünschten optischen Wegunterschied aus. Dieser Wegunterschied ist durch eine Differenzwellenfront beschreibbar, die für jeden Feldpunkt definiert ist und von Feldpunkt zu Feldpunkt variieren kann. Der mit erfindungsgemäßen optischen Korrekturmitteln ausgeglichene optische Wegunterschied läßt sich mit herkömmlichen Mitteln nicht korrigieren, die auf Licht unterschiedlicher Polarisationsrichtungen gleichermaßen wirken und folglich keine Differenzen der Wegunterschiede ausgleichen können. Erfindungsgemäße optische Korrekturmittel können dagegen die eingangs erwähnten Fehler aus Spannungsdoppelbrechung und Schichtwirkungen ausgleichen und verbessern daher die Leistungsfähigkeit des Projektionsobjektives. Die vorgeschlagene Korrektur der relativen Phasenflächen zu orthogonalen Polarisationsrichtungen ändert nicht die Amplitude der Felder und damit die Helligkeiten der Teilbilder. Vielmehr werden Lage und Form der Teilbilder dahingehend verändert, daß sie am gleichen Ort und in gleicher Form entstehen. Dieser Effekt ist erzielbar, indem die Kompensation so durchgeführt wird, dass Lichtstrahlen mit senkrecht zueinander gerichteten Polarisationsrichtungen in der Bildebene im wesentlichen den gleichen optischen Weg zurückgelegt haben. Ein entsprechender Effekt ergibt sich auch dann, wenn ein über den Einfallswinkelbereich im wesentlichen konstanter Wegunterschied eingeführt wird.

[0015] Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß sich durch die polarisationsselektiv wirkenden Einflüsse (insbesondere Einsatz spannungsdoppelbrechender Materialien und dielektrischer Schichten, die unter hohem Einfallswinkel betrieben werden) in der Bildebene für s- und p-polarisiertes Licht unterschiedliche Wellenfronten ergeben. Die Wellenfronten von s- und p-polarisiertem Licht können, bedingt durch verschiedene Konstruktionen und fertigungstechnische Schwankungen, zwischen verschiedenen Projektionsobjektiven relativ zueinander verkippt, astigmatisch deformiert, defokussiert und/oder auf andere Weise deformiert sein. Da Licht unterschiedlicher Polarisationsrichtungen unabhängig voneinander interferiert, entstehen zwei Teilbilder, die seitlich bzw. lateral sowie (auch in Abhängigkeit von der abgebildeten Strukturrichtung) in Richtung der optischen Achse zueinander versetzt sein können. Dieser Versatz polarisationspezifischer Teilbilder wird durch die Erfindung beseitigt, so daß darauf zurückgehende strukturabhängige Kontrastunterschiede vermieden werden.

[0016] Zudem können die Bildfehler einen Verlauf über das optisch genutzte Feld aufweisen. Diese Feldabhängigkeit führt zu einer sogenannten Variation der kritischen Dimension (CD) über das Feld. Dadurch werden in Abhängigkeit vom Feldort Linien gleicher Breite unterschiedlich breit abgebildet. Hierdurch kann sich die Qualität der gefertigten strukturierten Elemente zusätzlich vermindern. Auch diese Fehler können durch die Erfindung beseitigt werden.

[0017] Ein besonders bevorzugtes Projektionsobjektiv hat zwischen Objektebene und Bildebene einen katadioptrischen ersten Objektivteil und einen Konkavspiegel, eine

Strahlumlenkeinrichtung und hinter dieser einen dioptrischen zweiten Objektivteil. Die als Spiegelprisma ausgebildete Strahlumlenkeinrichtung hat eine erste Spiegelfläche zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel und eine zweite Spiegelfläche zur Umlenkung der von diesem reflektierten Strahlung in Richtung des zweiten Objektivteils. Ihr Grundaufbau kann dem in der EP-A-0 989 434 (entsprechend US-serial number 09/364382) gezeigten Aufbau entsprechen, bei dem der Konkavspiegel in einem schräggestellten Seitenarm des Objektives untergebracht ist.

[0018] Bei derartigen Reduktionsobjektiven treten an beschichteten ersten Umlenkspiegel größere Einfallswinkel auf als am beschichteten zweiten Umlenkspiegel. Die Erfinder haben herausgefunden, daß der dominante Effekt der Umlenkspiegelschichten in einem Kipp der Wellenfronten von s- und p-polarisiertem Licht in Scanrichtung (y-Richtung) besteht. Allein in Folge dieses Einflusses können die Teilbilder zu s- und p-polarisiertem Licht um mehrere Nanometer lateral auseinanderliegen. Dadurch werden in Scanrichtung orientierte Linien im wesentlichen ineinander überführt, während senkrecht dazu orientierte Linien doppelt nebeneinander abgebildet werden, was zur Verschmierung und Linienverbreiterung führt. Daher ist bei einer bevorzugten Weiterbildung vorgesehen, daß die Kompensation der optischen Wegunterschiede einen in einer Richtung senkrecht zur optischen Achse des Projektionsobjektives gerichteten, vorzugsweise linearen Gradienten des optischen Wegunterschiedes der Lichtstrahlen unterschiedlicher Polarisationsrichtung einführt, wodurch der beschriebene Kipp der Wellenfronten kompensierbar ist. Ein zur Kompensation dieser Wellenfrontverkipfung geeignetes optisches Korrekturmittel kann mindestens ein keilförmiges Verzögerungselement aus doppelbrechendem, d. h. polarisationspezifisch wirksamen Material umfassen. Es kann beispielsweise aus Magnesiumfluorid oder verspanntem Kalziumfluorid hergestellt sein. Bei geeigneter Orientierung eines derartigen Elementes im Bereich einer Pupillenebene des Projektionsobjektives ergibt sich aufgrund der Keilform gerade eine Kompensation eines Kipps der Differenzwellenfront. Durch einen zweiten Keil aus isotropem Material, der unabhängig von der Polarisationsrichtung wirkt, kann der Verzögerungskeil zu einer Planplatte ergänzt sein, die nur gering auf beide Polarisierungen gleichermaßen wirksam ist.

[0019] Als Alternative oder zusätzlich kann als optisches Korrekturmittel mindestens ein aus doppelbrechendem Material bestehendes Verzögerungselement vorgesehen sein, das einen quer zur optischen Achse verlaufenden Gradienten der Brechzahl Differenz für die beiden Polarisationsrichtungen aufweist.

[0020] Die optischen Korrekturmittel, welche einen erwünschten (kompensierend wirkenden) optischen Wegunterschied unterschiedlicher Polarisationsrichtungen in Abhängigkeit von Durchtrittsort und -winkel einführen, können grundsätzlich an beliebiger Stelle des Projektionsobjektives angeordnet sein. Es kann sich um gesonderte optische Komponenten handeln, gegebenenfalls kann die Kompensationswirkung aber auch durch geeignete Beschichtungen an existierenden optischen Komponenten des Systems bewirkt werden. Bevorzugt werden Fehler, die für alle Feldpunkte gleichermaßen auftreten, im Bereich einer Pupille des Projektionsobjektives kompensiert. Die Kompensation eines zusätzlichen Feldverlaufes des polarisationsabhängigen Wellenfrontfehlers erfolgt dagegen vorzugsweise im Bereich bzw. in der Nähe einer Feldebene des Projektionsobjektives, wobei hier ein über die Feldebene variierender Phasenunterschied der Feldkomponenten eingeführt wird.

[0021] Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Her-

stellung eines Projektionsobjektives, das optische Komponenten enthält, die in der eingangs beschriebenen Weise einen optischen Wegunterschied für die unterschiedlichen Polarisationsrichtungen des Lichtes einführen. Das Verfahren umfaßt folgende Schritte:

Aufbau des Projektionsobjektives mit Hilfe der optischen Komponenten;

Durchleuchtung des Projektionsobjektives mit Lichtbündeln, wobei ein Lichtbündel erste Lichtstrahlen mit einer ersten Polarisationsrichtung und zweite Lichtstrahlen mit einer von der ersten Polarisationsrichtung abweichenden zweiten Polarisationsrichtung enthält;

Bestimmung von Wellenfronten der durch das Projektionsobjektiv durchtretenden Lichtstrahlen, wobei polarisationsabhängig eine erste Wellenfront für die ersten Lichtstrahlen und eine zweite Wellenfront für die zweiten Lichtstrahlen bestimmt und die Wellenfronten zur Bestimmung einer Differenzwellenfront verarbeitet werden, die den Unterschied der optischen Wege der verschiedenen polarisierten Lichtstrahlen repräsentiert; und

Erzeugung mindestens eines optischen Korrekturmittels in Abhängigkeit von der Differenzwellenfront, wobei das optische Korrekturmittel derart zur Kompensation der optischen Wege der Lichtstrahlen ausgebildet ist, daß bei Einbau des optischen Korrekturmittels in das Projektionsobjektiv die Differenzwellenfront durch Kompensation der optischen Wege im wesentlichen unabhängig vom Strahleinfallswinkel ist.

[0022] Insbesondere kann die Korrektur so durchgeführt werden, dass die Differenzwellenfront im wesentlichen verschwindet.

[0023] Als Basis für die Fertigung eines optischen Korrekturmittels können beispielsweise Simulationsrechnungen anhand von gemessenen Materialparametern, wie z. B. Schichtcharakteristika, dienen. In diesem Fall können der Aufbau des Projektionsobjektives sowie dessen Durchleuchtung ausschließlich rechnergestützt bzw. virtuell durchgeführt werden. Ebenso kann die Bestimmung der Differenzwellenfront und die Auslegung eines entsprechenden optischen Korrekturmittels ausschließlich rechnergestützt bzw. virtuell erfolgen.

[0024] Es ist jedoch auch möglich, die Differenzwellenfront an einem real aufgebauten Projektionsobjektiv experimentell zu bestimmen. Beispielsweise ist es möglich, mittels eines Polarisators und Analysators für jede Polarisationsrichtung gesondert die Wellenfront oder ein Luftbild zu messen. Anhand dieser Meßergebnisse für das real aufgebaute Objektiv kann ein Kompensationselement individuell angefertigt und anschließend eingebaut werden.

[0025] Mögliche kompensierende Wirkungen erfindungsgemäßer optischer Korrekturmittel sind nicht auf die beispielhaft beschriebene Kompensation einer Verkippung der Wellenfront beschränkt. Alternativ oder zusätzlich sind beispielsweise auch rotationssymmetrische Differenzaberrationen korrigierbar, wie sie durch unter hohen Inzidenzwinkeln durchstrahlte Antireflexschichten auf Linsen entstehen können. Durch eine komplexere Art der Form, Verspannung und/oder des Verlaufes der doppelbrechenden Wirkung in optischen Korrekturteilen ist die Kompensation beliebiger Deformationen der Differenzwellenfront zwischen s- und p-polarisiertem Licht möglich.

[0026] Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich allein oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können, für die

hier Schutz beansprucht wird. Es zeigen:

[0027] Fig. 1 eine schematische Darstellung einer als Wafer-Stepper ausgebildeten Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem erfindungsgemäßen Projektionsobjektiv;

[0028] Fig. 2 ein Diagramm, das für mit einer Reflexionsschicht belegte Spiegel die optische Wegdifferenz von s- und p-polarisiertem Licht als Funktion des Einfallswinkels zeigt;

[0029] Fig. 3 ein Diagramm, das schematisch die Größenordnung der Differenzwellenfront (s - p) nach Reflexion an zwei Umlenkspiegeln zerlegt in Zernikekoeffizienten zeigt;

[0030] Fig. 4 ein schematisches Diagramm, das für den in Fig. 3 gezeigten Zernikekoeffizienten Z3 der Differenzwellenfront (s - p) dessen Verlauf über das optisch genutzte Feld zeigt;

[0031] Fig. 5 eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform eines optischen Korrekturmittels zur Kompensation einer Kippung der Differenzwellenfront;

[0032] Fig. 6 eine andere Ausführungsform eines optischen Korrekturmittels zur Kompensation einer Kippung der Differenzwellenfront;

[0033] Fig. 7 eine weitere Ausführungsform eines optischen Korrekturmittels zur Kompensation einer Kippung der Differenzwellenfront; und

[0034] Fig. 8 ein optisches Korrekturmittel zur Kompensation einer rotationssymmetrischen Differenzwellenfront.

[0035] In Fig. 1 ist schematisch eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in Form eines Wafer-Steppers 1 gezeigt, der zur Herstellung von hochintegrierten Halbleiterbauelementen vorgesehen ist. Die Projektionsbelichtungsanlage umfaßt als Lichtquelle einen Excimerlaser 2. Ein Beleuchtungssystem 4 erzeugt ein großes, scharf begrenztes und sehr homogen beleuchtetes Bildfeld, das an die Telezentrierfordernisse des nachgeschalteten Projektionsobjektives 5 angepaßt ist. Das Beleuchtungssystem 4 hat Einrichtungen zur Auswahl des Beleuchtungsmodus und ist beispielsweise zwischen konventioneller Beleuchtung mit variablem Kohärenzgrad, Ringfeldbeleuchtung und Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung umschaltbar. Hinter dem Beleuchtungssystem ist eine Einrichtung 6 zum Halten und Manipulieren einer Maske 7 so angeordnet, daß die Maske in der Bildebene 8 des Projektionsobjektives liegt und in dieser Ebene zum Scanbetrieb in einer Abfahrtrichtung 9 (y-Richtung) mittels eines Scanantriebs bewegbar ist.

[0036] Hinter der Maskenebene 8 folgt das Reduktionsobjektiv 5, das ein Bild der Maske in reduziertem Maßstab, beispielsweise im Maßstab 1 : 4 oder 1 : 5, auf einen mit einer Photoresistschicht belegten Wafer 10 abbildet, der in der Bildebene 11 des Reduktionsobjektives 5 angeordnet ist. Der Wafer 10 wird durch eine Einrichtung 12 gehalten, die einen Scannerantrieb umfaßt, um den Wafer synchron mit dem Retikel 7 parallel zu diesem zu bewegen. Alle Systeme werden in an sich bekannter Weise von einer Steuereinheit 13 gesteuert.

[0037] Das Projektionsobjektiv 5 hat zwischen seiner Objektebene (Maskenebene 8) und seiner Bildebene (Wafer-ebene 11) einen katadioptrischen ersten Objektivteil 15 mit einem Konkavspiegel 16, eine Strahlumlenkeinrichtung 17 und hinter dieser einen dioptrischen zweiten Objektivteil 18. Die als Spiegelprisma ausgebildete Strahlumlenkeinrichtung 17 hat eine ebene erste Spiegelfläche 19 zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel 16 und eine zweite Spiegelfläche 20 zur Umlenkung der von Konkavspiegel reflektierten Strahlung in Richtung des rein refraktiven zweiten Objektivteils 18. Der katadioptrische Objektivteil ist so ausgelegt, daß mit Abstand hinter dem zweiten Umlenkspiegel 20 im Bereich ei-

ner Zwischenbildebene 21 ein frei zugängliches Zwischenbild liegt, welches durch den dioptrischen Objektivtiefen in die Bildebene 11 abgebildet wird. Zwischen der Zwischenbildebene 21 und der Bildebene 11 liegt eine Pupillenebene 22 des Projektionsobjektivs.

[0038] Der Grundaufbau des Projektionsobjektivs kann dem Aufbau der Projektionsobjektive entsprechen, die in der EP-A-0 989 434 gezeigt sind. Die Offenbarung dieses Dokumentes wird insoweit durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht. Eine Besonderheit der Objektivkonstruktion besteht darin, daß der Konkavspiegel 16 in einem schräg gestellten Seitenarm des Projektionsobjektivs untergebracht ist. Hierdurch kann u. a. auf der Maskenseite ein ausreichender Arbeitsabstand über die gesamte Breite des Objektivs sichergestellt werden. Entsprechend weicht der Anstellwinkel des ersten Umlenkspiegels 19 und des zweiten Umlenkspiegels 20 gegenüber der senkrecht durch die Objektebene 8 verlaufenden optischen Achse 23 von  $45^\circ$  ab, so daß der Ablenkwinkel am ersten Umlenkspiegel 19 größer als  $90^\circ$  ist.

[0039] Die Belichtungsanlage ist zur Erzielung von Auflösungen von  $0,2\text{ }\mu\text{m}$  oder darunter und hohe Durchsatzleistungen für Arbeitswellenlängen von weniger als ca.  $260\text{ nm}$  ausgelegt, insbesondere für  $193\text{ nm}$  oder  $157\text{ nm}$ , und hat eine numerische Apertur (NA) zwischen ca. 0,5 und ca. 0,9. Entsprechend der kurzen Wellenlängen bestehen die transparenten optischen Komponenten aus Quarzglas oder Fluoridkristallmaterial, beispielsweise Calciumfluorid, wobei je nach Ausführungsform sowohl die Verwendung nur eines einzigen dieser Materialien, als auch einer Kombination dieser Materialien möglich ist. Da diese Materialien spannungsoptisch wirksam sind, kann das durchtretende Licht in einer Weise beeinflusst werden, die für die senkrecht zueinander ausgerichteten Feldkomponenten des elektrischen Feldvektors des durchtretenden Lichts (s-Polarisation bzw. p-Polarisation) unterschiedlich ist. Zudem sind bei der gezeigten Ausführungsform die mit einer reflektierenden Schicht belegten Umlenkspiegel 19, 20 zusätzlich mit einer reflexionsverstärkenden, dielektrischen Beschichtung belegt. Im Beispiel handelt es sich um eine Einzelschicht aus Magnesiumfluorid, bei anderen Ausführungsformen können auch Mehrfachschichten vorgesehen sein.

[0040] Diese hochreflektierenden Schichten (HR-Schicht) auf den Umlenkspiegeln führen einen polarisationsabhängigen Phasenunterschied zwischen s- und p-Polarisation in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Strahlen ein, da sie je nach Einfallswinkel einen unterschiedlichen optischen Weg für das eintreffende Licht darstellen. Dabei treten bei der Ausführungsform aufgrund der Schrägstellung des des Konkavspiegel 16 tragenden Seitenarms am ersten Umlenkspiegel 19 größere Strahleinfallswinkel auf als am zweiten Umlenkspiegel 20. Wie aus Fig. 2 schematisch ersichtlich, liegen die Einfallswinkel am ersten Spiegel 19 im Bereich zwischen ca.  $45^\circ$  und ca.  $65^\circ$ , während sie am zweiten Umlenkspiegel nur zwischen ca.  $35^\circ$  und ca.  $55^\circ$  liegen. In Fig. 2 ist als durchgezogene Linie auch die optische Wegdifferenz (s - p) zwischen s- und p-polarisiertem Licht in Abhängigkeit von Einfallswinkel gezeigt. Es ist erkennbar, daß im wesentlichen der erste Umlenkspiegel 19 einen Unterschied in den optischen Wegdifferenzen zwischen s- und p-polarisiertem Licht erzeugt. Für Strahlen eines divergenten Lichtbündels ergibt sich dabei für diejenigen Strahlen, die unter relativ kleinerem Einfallswinkel auffallen, ein positiver Wegunterschied und für die unter relativ größerem Einfallswinkel auffallenden ein negativer optischer Wegunterschied. Im übrigen stört ein konstanter Phasenunterschied zwischen s- und p-polarisiertem Licht bei den Intensitäten im Bild nicht, so daß im hier dargestellten Beispiel der

zweite Umlenkspiegel 20 weniger kritisch ist.

[0041] Anhand Fig. 3 wird deutlich, daß bei dem hier gezeigten Beispiel der dominante Effekt der Umlenkspiegelschichten 19, 20 auf die Differenzwellenfront (s - p) in einer Verkipfung der Wellenfront in Scanrichtung (y-Richtung) besteht. Zur Verdeutlichung sind in Fig. 3 die Größenordnungen verschiedener niedriger Zernikekoeffizienten Z2 bis Z6 der Differenzwellenfront (s - p) des hier beispielhaft beschriebenen Systems (in Längeneinheiten) dargestellt. Daraus ergibt sich, daß der wesentliche Beitrag im Zernikekoeffizienten Z3 liegt, der die Verkipfung in y-Richtung beschreibt. Es kann errechnet werden, daß die Teilbilder zu s- und p-polarisiertem Licht allein in Folge dieses Einflusses um bis zu ca.  $4\text{ nm}$  auseinander liegen können. Dadurch werden in Scan- oder Abfahrtrichtung orientierte Linien des Musters im wesentlichen ineinander überführt (keine Linienverbreiterung), während senkrecht zur Bildablage orientierte Linien doppelt nebeneinander abgebildet werden. Dies führt zu Verschmierung und Linienverbreiterung und bedeutet eine Abhängigkeit der Breite abgebildeter Linien von ihrer Orientierung (H-V-Differenz).

[0042] Aus den unterschiedlichen Auftreffwinkeln der Lichtbündel in verschiedenen Feldpunkten auf die Umlenkspiegel ergibt sich außerdem eine Feldabhängigkeit der hier beschriebenen Bildfehler, also einen Verlauf über das optisch genutzte Feld. Hierzu ist beispielhaft in Fig. 4 schematisch der Verlauf des (dominierenden) Zernikekoeffizienten Z3 der Differenzwellenfront (s - p) über das optisch genutzte Feld (willkürliche Einheiten für x-y-Richtung) gezeigt. Es ist erkennbar, daß die Größenordnung des Verkipfungsfehlers, repräsentiert durch den Koeffizienten Z3, senkrecht zur Abfahrtrichtung (d. h. in x-Richtung) etwa konstant ist, während sie in Abfahrtrichtung (y-Richtung) im wesentlichen linear variiert.

[0043] Zur Kompensation der geschilderten Effekte sind in erfindungsgemäßen Projektionsobjektiven optische Korrekturmittel vorgesehen, die einen erwünschten optischen Wegunterschied für Licht unterschiedlicher Polarisationsrichtungen in Abhängigkeit von Durchtrittsort und Durchtrittswinkel einführen. Die Korrekturmittel liegen bevorzugt in Form gesonderter, besonders auf das Projektionsobjektiv angepaßter Bauelemente vor. Es ist jedoch auch möglich, die optischen Korrekturmittel an ohnehin vorhandenen optischen Komponenten anzubringen, beispielsweise in Form geeignet ausgelegter, unterschiedlicher Beschichtungen für den ersten und den zweiten Umlenkspiegel.

[0044] Die optischen Korrekturmittel können an beliebiger Stelle des Projektionsobjektivs eingebaut bzw. angeordnet sein. Es ist jedoch vorteilhaft, wenn Fehler, die für alle Feldpunkte gleichermaßen auftreten (vgl. Fig. 3) im Bereich einer Pupillenebene korrigiert werden, beispielsweise bei der Pupillenebene 22 oder im Bereich des Konkavspiegels 16. Zur Korrektur eines zusätzlichen Feldverlaufes des polarisationsabhängigen Wellenfrontfehlers, wie anhand von Fig. 4 erläutert, wird vorzugsweise mindestens ein optisches Korrekturmittel in Feldnähe angebracht, also beispielsweise im Bereich der Zwischenbildebene 21.

[0045] Optische Korrekturteilelemente der hier betrachteten Art sollen bevorzugt so gefertigt sein, daß sie nur polarisationsspezifisch wirken, jedoch einen möglichst geringen Einfluß auf beide Polarisationsrichtungen gleichermaßen ausüben und dadurch möglichst wenige unerwünschte Bildfehler erzeugen. Die optischen Korrekturmittel sind vorzugsweise teilweise oder vollständig aus doppelbrechendem Material gefertigt, beispielsweise aus Magnesiumfluorid oder gezielt verspanntem Calciumfluorid. Eine Ausführungsform eines optischen Korrekturtelementes 25 zur Korrektur einer Verkipfung der Differenzwellenfront ist in Fig. 5 schematisch

tisch gezeigt. Es besteht im wesentlichen aus einem keilförmigen Verzögerungselement 26 aus doppelbrechendem Material, dessen kristallographische Achse 27 in Keilrichtung, d. h. in Richtung zunehmender oder abnehmender axialer Dicke ausgerichtet ist. Das nach Art einer Komparätorplatte ausgebildete Verzögerungselement 26 wird mit einem gegengleich geformten Keilelement 28 aus optisch isotropem Material, z. B. unverspanntem Calciumfluorid, zu einer planparallelen Platte ergänzt. Die Keile können durch Aneinandersprengen oder Verkitten miteinander verbunden sein. Es ist auch möglich, das nicht polarisationspezifische Element 28 losgelöst vom Verzögerungskeil 26 an anderer geeigneter Stelle im Objektiv anzuordnen.

[0046] Fällt nun Licht senkrecht zur Kristallachse 27 des Verzögerungselementes 26 durch das optische Korrektürelement, so wird für einen Lichtstrahl 29, der im Bereich dünnerer Verzögerungskeildicken das Element durchdringt, ein wesentlich geringerer Unterschied im optischen Weg der beiden Polarisationsrichtungen erzeugt, als für einen Strahl 30, der durch den dickeren Bereich des Verzögerungskeiles 26 dringt. Bei geeigneter Wahl von Vorzeichen und Betrag für die erzeugten optischen Wegunterschiede und geeigneter Anordnung des Korrektürelementes mit passender Orientierung z. B. nahe der Pupillenebene 22 kann sich aufgrund der Keilform gerade eine Kompensation einer Verkippung der Differenzwellenfront ergeben, wie sie durch den Pupillen-Zernikekoeffizienten Z3 (Fig. 3) repräsentiert wird. Eine zusätzliche Abhängigkeit des optischen Wegunterschiedes zwischen den Polarisationsrichtungen vom Eintrittswinkel der Strahlen kann den feldabhängigen Verlauf, wie in Fig. 4 dargestellt, mindestens teilweise vermindern. Durch den unabhängig von der Polarisationsrichtung wirkenden zweiten Keil 28 wird der erste Keil zu einer Planplatte ergänzt, die nur gering auf beide Polarisationsrichtungen gleichermaßen wirkt. Durch das optische Korrektürelement 25 wird also ein senkrecht zur Durchstrahlrichtung verlaufender linearer Gradient des optischen Wegunterschiedes der Feldkomponenten eingeführt.

[0047] Eine andere Möglichkeit eines optischen Korrektürelementes zur Kompensation einer Verkippung der Differenzwellenfront ist in Fig. 6 gezeigt. Das Element 35 besteht im wesentlichen aus einer planparallelen Platte 36 aus doppelbrechendem Material mit einer senkrecht zur Plattenebene verlaufenden Kristallachse 37. Das Plattenmaterial ist so gewählt bzw. behandelt, daß die Platte einen ortsabhängigen Verlauf der doppelbrechenden Wirkung aufweist, im Beispiel einen linearen Anstieg der Brechzahldifferenz vom oberen zum unteren Teil. Insgesamt wirkt das optische Korrektürelement wiederum wie eine planparallele Platte. Sie steht im Einbauszustand derart schräg bezüglich der Durchstrahlrichtung, daß durchdringende Strahlung in einem Neigungswinkel windschief zur Kristallachse 37 durchtritt.

[0048] Die optische Wirkung des Korrektürelementes 35 ist ähnlich der in Fig. 5 gezeigten Ausführungsform. Für Strahlung 38, die im oberen, schwächer doppelbrechenden Bereich durch die Platte tritt, ergibt sich ein relativ kleiner optischer Wegunterschied für die unterschiedlich polarisierten Lichtstrahlen des durchtretenden Lichts. Für Strahlung 39, die im unteren, stärker doppelbrechenden Bereich durch die Platte tritt, ergibt sich eine stärkere Verzögerungsdifferenz für die beiden Polarisationsrichtungen des Lichts. Insgesamt läßt sich auch auf diese Weise der beschriebene Kipp der Differenzwellenfront ausgleichen, wenn der Betrag des Gradienten der doppelbrechenden Wirkung und die Ausrichtung des Elementes geeignet gewählt werden. Wiederum wird ein derartiges Element im Bereich der Systempupille 22 angeordnet, um die Verkippung der Differenzwellenfront auszugleichen. Wiederum tritt eine Variation in der

optischen Wegdifferenz zwischen beiden Polarisierungen am gleichen Elementort je nach Eintrittswinkel auf, die zu einer Verminderung der Feldabhängigkeit genutzt werden kann.

5 [0049] Die gleiche optische Wirkung ist auch durch eine planparallele Gradientenplatte 40 erzielbar, die derart schräg zur Kristallachse 41 geschnitten ist, daß sie als unverkippt eingebaute Platte in der beschriebenen Weise polarisationsoptisch wirksam ist (Fig. 7).

10 [0050] Die Erfindung kann auch dazu benutzt werden, alternativ oder zusätzlich zur beschriebenen Korrektur einer verkipperten Differenzwellenfront typische rotationssymmetrische Verläufe von Differenzwellenfronten zu kompensieren. Eine rotationssymmetrische Differenzwellenfront zeichnet sich dadurch aus, daß bezogen auf eine optische Achse des Systems die optischen Weglängen in Radialrichtung variieren, beispielsweise derart, daß eine Weglängendifferenz zwischen s- und p-polarisiertem Licht in der Nähe der optischen Achse kleiner oder größer ist als am Rand eines durchstrahlten Bereiches. Derartige Weglängendifferenzen können sich insbesondere durch Antireflexbeschichtungen auf Linsen ergeben, die unter hohen Einfallswinkeln des Lichtes durchstrahlt werden. Zwar sind typische, durch derartige Beschichtungen verursachte Weglängendifferenzen einer einzelnen Schicht relativ klein, beispielsweise in der Größenordnung unterhalb von 1 nm, jedoch sind beispielsweise bei modernen mikrolithographischen Projektionsobjektiven viele unter starker Winkelbelastung betriebene Linsen und damit viele derartige Beschichtungen vorhanden, deren Wirkungen sich addieren können. Derartige rotationssymmetrische Differenzwellenfrontverläufe können bei rotationssymmetrischen Projektionsobjektiven, insbesondere also bei rein refraktiven Systemen, eine dominante Rolle spielen. Bei katadioptrischen Systemen, von denen hier eines als Beispiel beschrieben ist, können sich diese Wegunterschiede den durch Spiegel verursachten Wegunterschieden überlagern.

35 [0051] In Fig. 8 ist schematisch ein optisches Korrekturmittel 45 zur Kompensation einer sphärischen Differenzaberration gezeigt. Es umfaßt ein kreisrundes Verzögerungselement 46 aus doppelbrechendem Material, dessen kristallographische Achse 47 senkrecht zur zentralen Symmetrieachse 48 des Elementes verläuft. Das Element hat eine ebene Eintrittsfläche 49 und eine sphärisch gekrümmte Austrittsfläche 50, die derart zur Eintrittsfläche gekrümmt ist, daß die axiale Dicke des Elementes im Zentrum kleiner ist als am Rand. Durch ein optisch isotropes Element 51 mit sphärisch gekrümmter Eintrittsfläche und ebener Austrittsfläche 52, welches mit dem Verzögerungselement 46 entlang der sphärischen Flächen verkittet ist, entsteht ein insgesamt planparalleles Kompensationselement 45.

40 [0052] Fällt nun Licht parallel zur optischen Achse 48 durch das Element, so wird bei Lichtstrahlen 53, die das Element in seinem Randbereich durchstrahlen, beim Durchtritt ein wesentlich größerer Unterschied im optischen Weg der beiden Polarisationsrichtungen erzeugt als für Strahlen 54, die das Element in seinem Zentralbereich durchdringen. Auf diese Weise können rotationssymmetrische Differenzaberrationen korrigiert werden, wie sie beispielsweise durch die Zernikekoeffizienten Z4, Z9 und Z16 repräsentiert werden.

50 [0053] Das Prinzip der Erfindung wurde beispielhaft für die Kompensation einer Verkippung der Differenzwellenfront und einer rotationssymmetrischen Differenzwellenfront beschrieben. Mögliche kompensierende Wirkungen erfindungsgemäßer optischer Korrekturmittel sind jedoch nicht auf die Kompensation derartiger Differenzwellenfrontdeformationen beschränkt. Durch eine komplexere Art der Form, Verspannung und/oder des Verlaufs der doppel-



brechenden Wirkung in Verzögerungselementen ist die Kompensation einer beliebigen Deformation der Differenzwellenfront zwischen s- und p-polarisiertem Licht möglich. Selbstverständlich können auch mehrere erfindungsgemäße optische Korrekturmittel hintereinander im Strahlengang angeordnet sein, um eine komplexere Korrektur zu bewirken.

[0054] Als Basis für die Fertigung derartiger kompensierender Elemente können Simulationsrechnungen anhand von gemessenen Materialparametern, wie z. B. Schichtcharakteristika der Reflexbeschichtungen, dienen. Erfindungsgemäße Korrekturmittel können also von vorne herein beim Design eines Projektionsobjektives rechnergestützt berücksichtigt werden. Auch ein experimenteller Weg zur Darstellung geeigneter Kompensationsmittel ist möglich. Beispielsweise kann an einem fertig montiertem Projektionsobjektiv, das noch keine erfindungsgemäßen optischen Korrekturmittel enthält, mittels eines Polarisators und eines Analysators für jede Polarisationsrichtung gesondert die Wellenfront oder das Luftbild vermessen werden. Anhand dieser Meßergebnisse für das real aufgebaute Objektiv können dann ein oder mehrere geeignete Kompensationselemente individuell angefertigt und an geeigneter Stelle in der richtigen Orientierung eingebaut werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Erzeugung eines Bildes eines in einer Objektebene eines Projektionsobjektives angeordneten Musters in eine Bildebene des Projektionsobjektives mit folgenden Schritten:  
Beleuchtung des Musters mit Licht zur Erzeugung eines Lichtbündels, welches erste Lichtstrahlen mit einer ersten Polarisationsrichtung und zweite Lichtstrahlen mit einer von der ersten Polarisationsrichtung abweichenden zweiten Polarisationsrichtung aufweist;  
Durchstrahlung des Lichtbündels durch das Projektionsobjektiv, wobei die Lichtstrahlen des Lichtbündels mit unterschiedlichen Einfallswinkeln auf optische Komponenten des Projektionsobjektives einfallen und wobei, bedingt durch den optischen Aufbau, zwischen einem von den ersten Lichtstrahlen zurückgelegten ersten optischen Weg und einem von den zweiten Lichtstrahlen zurückgelegten zweiten optischen Weg in mindestens einem Bereich der Bildebene ein optischer Wegunterschied auftritt;  
Kompensation des optischen Wegunterschiedes durch gezielte Veränderung des ersten optischen Weges und/oder des zweiten optischen Weges derart, daß in der Bildebene eine Differenz der optischen Wege der ersten Lichtstrahlen und der zweiten Lichtstrahlen im wesentlichen unabhängig vom Strahleneinfallswinkel ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Kompensation des optischen Wegunterschiedes ein senkrecht zur optischen Achse des Projektionsobjektives gerichteter Gradient des optischen Wegunterschiedes der Lichtstrahlen eingeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß ein linearer Gradient des optischen Wegunterschiedes eingeführt wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein zur optischen Achse rotationssymmetrischer Gradient des optischen Wegunterschiedes eingeführt wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Kompensation

des optischen Wegunterschiedes im Bereich einer Pupille des Projektionsobjektives eingeführt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Kompensation optischer Wegunterschiede im Bereich einer Feldebene des Projektionsobjektives eingeführt wird, insbesondere im Bereich eines Zwischenbildes, wobei bei der Kompensation eine über die Feldebene variierende Phasendifferenz zwischen den Lichtstrahlen unterschiedlicher Polarisationsrichtung eingeführt wird.

7. Projektionsobjektiv, insbesondere katadioptrisches Reduktionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsanlage, zur Abbildung eines in einer Objektebene (8) angeordneten Musters in eine Bildebene (11) mit Hilfe von Licht, das erste Lichtstrahlen mit einer ersten Polarisationsrichtung und zweite Lichtstrahlen mit einer von der ersten Polarisationsrichtung abweichenden zweiten Polarisationsrichtung enthält, das Projektionsobjektiv mit optischen Komponenten (19, 20), die von durchtretenden Lichtstrahlen unter unterschiedlichen Einfallswinkeln beleuchtbar sind, wobei, bedingt durch den optischen Aufbau, zwischen einem von den ersten Lichtstrahlen zurückgelegten ersten optischen Weg und einem von den zweiten Lichtstrahlen zurückgelegten zweiten optischen Weg in mindestens einem Bereich der Bildebene (11) ein optischer Wegunterschied auftritt, gekennzeichnet durch mindestens ein optisches Korrekturmittel (25, 35), das zur Korrektur optischer Wegunterschiede der Lichtstrahlen durch gezielte Veränderung des ersten optischen Weges und/oder des zweiten optischen Weges derart ausgebildet ist, daß der optische Wegunterschied in der Bildebene im wesentlichen unabhängig vom Strahleneinfallswinkel ist.

8. Projektionsobjektiv nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Korrekturmittel (25, 35, 45) zur Erzeugung eines im wesentlichen senkrecht zur optischen Achse (23) des Projektionsobjektives (5) gerichteten Gradienten eines Phasenunterschiedes zwischen den Lichtstrahlen unterschiedlicher Polarisationsrichtung ausgebildet ist.

9. Projektionsobjektiv nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Korrekturmittel (25, 35) zur Erzeugung eines linearen Gradienten des Phasenunterschiedes ausgebildet ist.

10. Projektionsobjektiv nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Korrekturmittel (25) mindestens ein keilförmiges Verzögerungselement (26) aus doppelbrechendem Material aufweist.

11. Projektionsobjektiv nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Korrekturmittel (45) zur Erzeugung eines zur optischen Achse (48) rotationssymmetrischen Gradienten des Phasenunterschiedes ausgebildet ist, insbesondere eines im wesentlichen sphärischen Gradienten.

12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Korrekturmittel (45) ein aus doppelbrechendem Material bestehendes Verzögerungselement (46) aufweist, das axial durch eine ebene Fläche (49) und durch eine vorzugsweise sphärisch gekrümmte Fläche (50) begrenzt ist.

13. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Korrekturmittel (25, 45) ein aus doppelbrechendem Material bestehendes Verzögerungselement (26, 46) und ein optisches Element (28, 51) aus einem optisch isotropen Material aufweist, wobei das isotrope optische Element (28, 51) in Bezug auf das Verzögerungselement (26, 46) derart komplementär geformt und ausgerichtet ist,

daß das Verzögerungselement (26, 46) und das isotrope optische Element (28, 51) eine planparallele optische Komponente (25, 45) bilden.

14. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 7 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Korrekturmittel (35) mindestens ein aus doppelbrechendem Material bestehendes Verzögerungselement (36) mit einem quer zur optischen Achse (23) des Projektionsobjektives verlaufenden Gradienten der Brechzahl-differenz aufweist.

15. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 7 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Korrekturmittel (25, 35) die Gesamtform einer planparallelen Platte hat.

16. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 7 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Projektionsobjektiv (5) ein katadioptrisches Projektionsobjektiv mit mindestens einem Konkavspiegel (16) und mindestens einem Umlenkspiegel (19, 20) zwischen Objektebene (8) und Bildebene (11) ist.

17. Projektionsobjektiv nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß es zwischen Objektebene (8) und Bildebene (11) einen katadioptrischen ersten Objektivteil (15) mit einem Konkavspiegel (16) und einer Strahlumlenkrichtung (17) und hinter der Strahlumlenkrichtung einen dioptrischen zweiten Objektivteil (18) aufweist, wobei vorzugsweise die Strahlumlenkeinrichtung (17) eine erste Spiegelfläche (19) zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel (16) und eine zweite Spiegelfläche (20) zur Umlenkung der von dem Konkavspiegel reflektierten Strahlung in Richtung des zweiten Objektivteils (18) aufweist.

18. Projektionsobjektiv nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Umlenkspiegel (19) in einem von  $45^\circ$  abweichenden Anstellwinkel zur optischen Achse (23) des Projektionsobjektives derart ausgerichtet ist, daß ein Ablenkwinkel zum Konkavspiegel (16) von mehr als  $90^\circ$  entsteht.

19. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 7 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß es mindestens eine Pupillenfläche (16, 22) hat und daß im Bereich der Pupillenfläche (16, 22) mindestens ein optisches Korrekturmittel (25, 35, 45) angeordnet ist.

20. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 7 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Objektebene (8) und der Bildebene (11) mindestens ein im Bereich einer Zwischenbildebene (21) angeordnetes, reelles Zwischenbild liegt und daß mindestens ein optisches Korrekturmittel (25, 35, 45) im Bereich der Zwischenbildebene (21) angeordnet ist.

21. Verfahren zur Herstellung eines Projektionsobjektives, das optische Komponenten enthält und mit Licht durchstrahlbar ist, das erste Lichtstrahlen mit einer ersten Polarisationsrichtung und zweite Lichtstrahlen mit einer von der ersten Polarisationsrichtung abweichenden zweiten Polarisationsrichtung enthält, wobei die optischen Komponenten durch ein durchtretendes Lichtbündel mit Lichtstrahlen unterschiedlicher Einfallswinkel beleuchtbar sind und, bedingt durch den optischen Aufbau, zwischen einem von den ersten Lichtstrahlen zurückgelegten ersten optischen Weg und einem von den zweiten Lichtstrahlen zurückgelegten zweiten optischen Weg in mindestens einem Bereich einer Bildebene des Projektionsobjektives ein optischer Wegunterschied auftritt, das Verfahren mit folgenden Schritten:

Aufbau des Projektionsobjektives mit Hilfe der opti-

schen Komponenten;

Durchleuchtung des Projektionsobjektives mit Lichtbündeln, wobei ein Lichtbündel erste Lichtstrahlen und senkrecht dazu polarisierte zweite Lichtstrahlen enthält;

Bestimmung von Wellenfronten von durch das Projektionsobjektiv durchtretenden Lichtstrahlen, wobei polarisationsabhängig eine erste Wellenfront für die ersten Lichtstrahlen und eine zweite Wellenfront für die zweiten Lichtstrahlen bestimmt und die Wellenfronten zur Bestimmung einer Differenzwellenfront verarbeitet werden;

Erzeugung mindestens eines optischen Korrekturmittels in Abhängigkeit von der Differenzwellenfront, wobei das optische Korrekturmittel derart zur Kompensation der optischen Wege der Lichtstrahlen ausgebildet ist, daß bei Einbau des optischen Korrekturmittels in das Projektionsobjektiv die Differenzwellenfront durch Kompensation der optischen Wege im wesentlichen unabhängig vom Strahleinfallswinkel wird; und Einbau des optischen Korrekturmittels in das Projektionsobjektiv.

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß der Aufbau und die Durchleuchtung des Projektionsobjektives sowie die Bestimmung von Wellenfronten und die Bestimmung der Differenzwellenfront, und vorzugsweise auch die Erzeugung des mindestens einen optischen Korrekturmittels, rechnergestützt durchgeführt werden.

23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens ein optisches Korrekturmittel auf Basis von rechnerisch ermittelten Parametern für das optische Korrekturmittel gefertigt wird.

24. Verfahren nach Anspruch 21 oder 22, gekennzeichnet durch eine experimentelle Bestimmung einer Differenzwellenfront an einem real aufgebauten Projektionsobjektiv zur Bestimmung von Fertigungsparametern für ein optisches Korrekturelement und Fertigung des optischen Korrekturelementes aufgrund der experimentell bestimmten Parameter.

25. Optisches Korrekturmittel, insbesondere für den Einbau in ein Projektionsobjektiv nach Anspruch 7 oder 16 bis 18 zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6, gekennzeichnet durch die Merkmale des kennzeichnenden Teils von mindestens einem der Ansprüche 8 bis 15.

26. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:

Bereitstellung einer Maske mit einem vorgegebenen Muster in der Objektebene eines Projektionsobjektives; Beleuchtung der Maske mit Ultraviolettlicht;

Projektion eines Bildes des Musters auf ein im Bereich der Bildebene des Projektionsobjektives angeordnetes, lichtempfindliches Substrat mit Hilfe eines Projektionsobjektives nach einem der Ansprüche 7 bis 20.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen



- Leerseite -

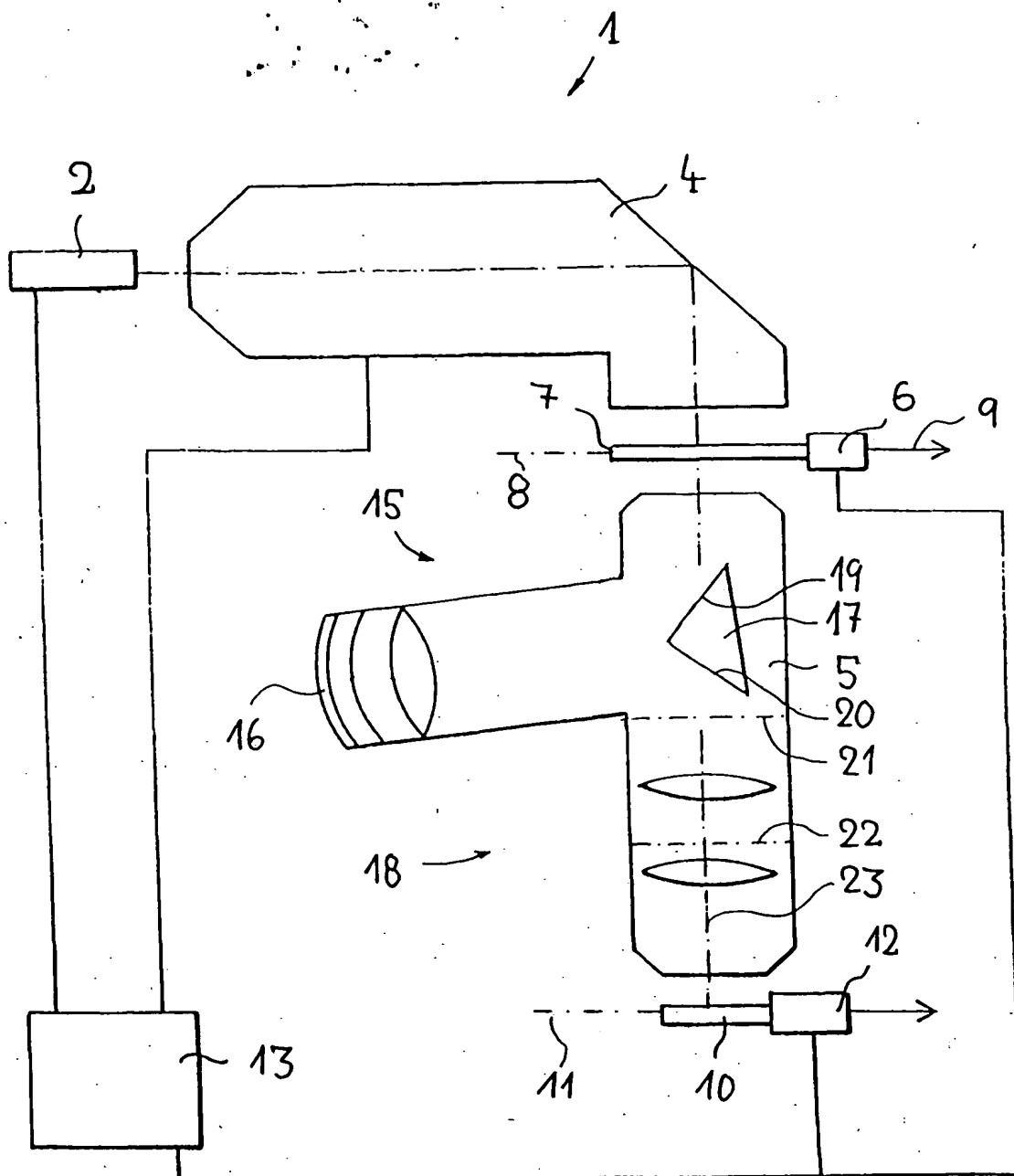


Fig. 1

Fig. 2

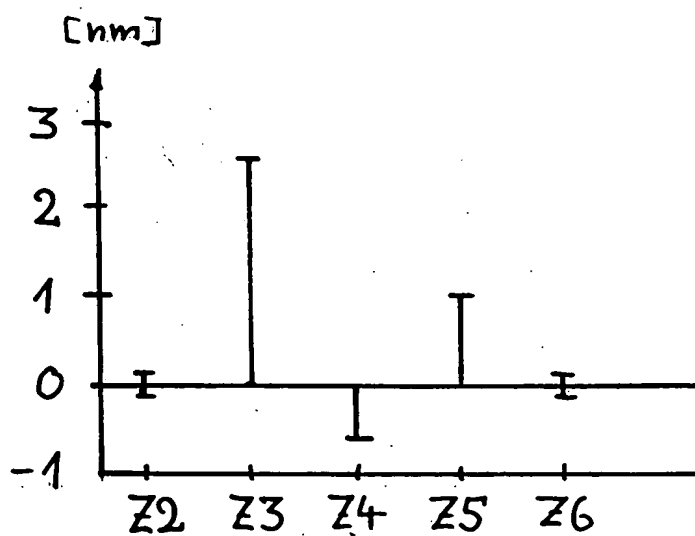
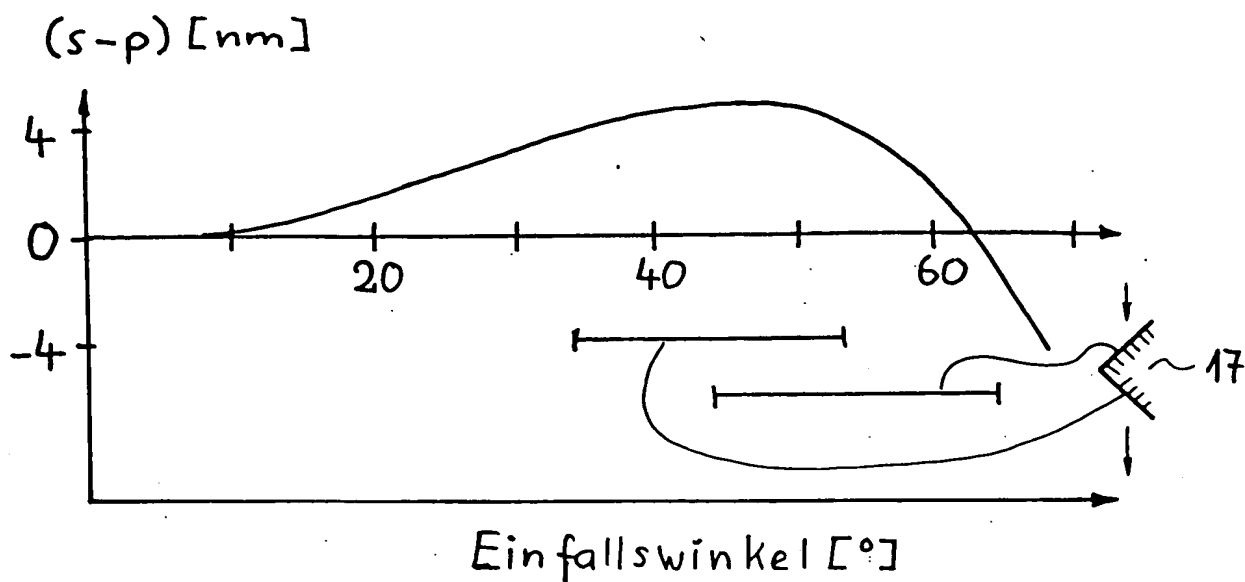


Fig. 3

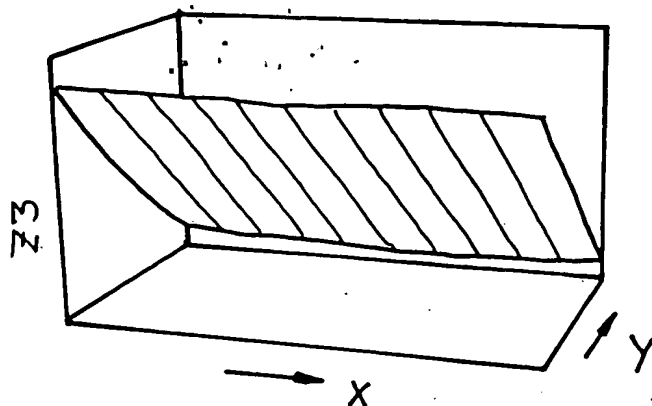


Fig. 4

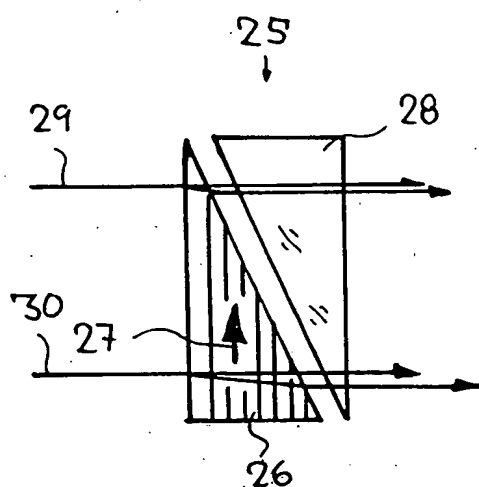


Fig. 5

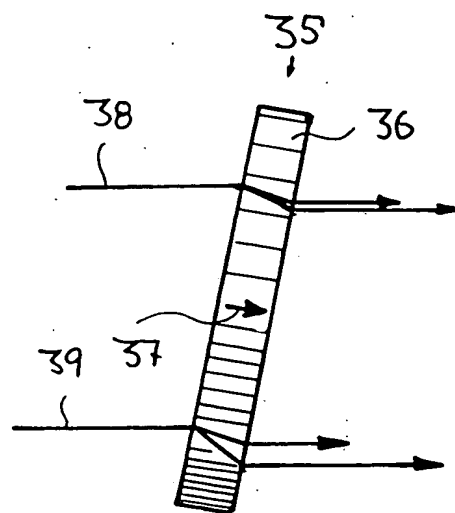


Fig. 6

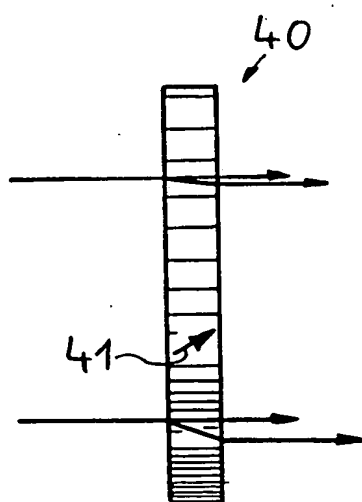


Fig. 7

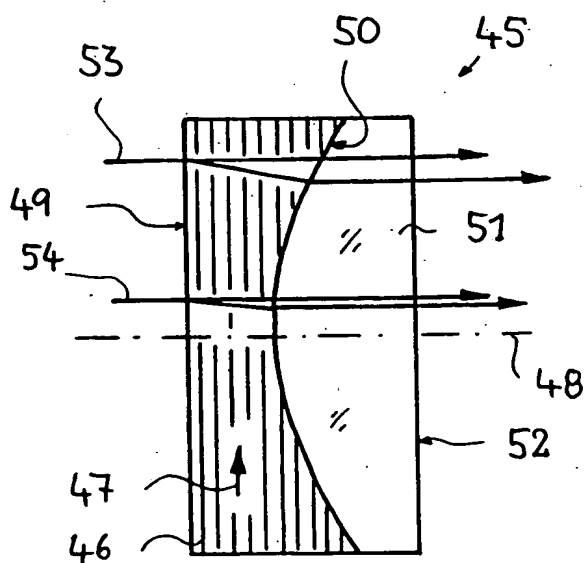


Fig. 8